

.....

# Efecto de las perturbaciones: huecos de tensión, desequilibrios de tensión y armónicos, en los motores de inducción con rotor Jaula de Ardilla

Effect of disturbances: voltage sags, voltage unbalance and  
harmonics in induction motors with squirrel cage rotor

*Adolfo Andrés Jaramillo Matta\**

## *Abstract*

This paper presents a review of the effects of three electromagnetic disturbances: voltage dips (sags or dips), voltage unbalance and voltage harmonics, on induction motors with squirrel cage. A summary is presented of the most relevant researches related and own research results.

**Keywords:** Power quality, induction motors, mathematical modeling, electromagnetic disturbances.

## *Resumen*

En este artículo se presenta una revisión de los efectos de tres perturbaciones electromagnéticas: huecos de tensión (sags o dips), desequilibrios de tensión y armónicos, sobre los motores de inducción con jaula de ardilla. Se realiza un resumen de algunas de las investigaciones relacionadas más relevantes y se presentan resultados de investigaciones propias.

**Palabras clave:** Calidad de potencia, motores de inducción, modelado matemático, perturbaciones electromagnéticas.

## **1. Introducción**

La calidad de energía eléctrica es un tema de gran interés en la actualidad, debido en gran parte al efecto que tienen las perturbaciones electromagnéticas tanto en el sistema eléctrico actual como en nuevas estructuras eléctricas, tales como las redes inteligentes (smart grids) y las microrredes.

---

Fecha Recibido: 2013-10-15

Fecha Aprobado: 2013-08-18

\* Ph.D., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo LIFAE,CIDC  
ajaramillom@udistrital.edu.co



Entre los efectos más severos producidos por una deficiente calidad de energía eléctrica se encuentran: mal funcionamiento de sistemas de control y protección, paros indeseados en la producción industrial, elevado consumo de energía eléctrica, disminución de la vida útil en dispositivos, fallas en la medición del consumo de energía y pérdida de información en centros de cómputo. Las causas más comunes de disminución en la calidad de energía eléctrica provienen de maniobras en la red eléctrica, descargas atmosféricas y funcionamiento de accionamientos electromecánicos, entre otros.

Los accionamientos electromecánicos constituidos por motores de inducción con rotor de jaula de ardilla son los más utilizados en la industria mundial, debido a características del motor tales como: facilidad en su construcción, necesidad mínima de mantenimiento, gran torque inicial, facilidad de conexión, pérdidas mínimas, entre otras. En el estudio de los efectos de las perturbaciones electromagnéticas sobre éstos motores, pueden abordarse dos puntos de vista, el primero corresponde a éstos dispositivos vistos como carga afectada; el segundo se enfoca hacia las perturbaciones producidas por éstos dispositivos, particularmente cuando actúan con dispositivos electrónicos de potencia, como variadores de velocidad.

El estudio de las perturbaciones electromagnéticas y la calidad de potencia en las líneas de transmisión eléctrica ha tomado mayor importancia en los últimos años, debido al incremento en la industria de dispositivos basados en electrónica de potencia, sistemas de control, automatización, protección y maniobras, que generan perturbaciones a la red y deterioran la calidad de energía eléctrica. Los efectos alcanzan tanto a usuarios industriales como residenciales, disminuyendo la eficiencia de sus sistemas eléctricos en diferentes formas, por ejemplo, generando paros inesperados en la producción (produciendo importantes sobrecostos en la producción y consumo energético), disminuyendo el tiempo de vida útil de los dispositivos, generando fallas en las medidas de los elementos de medición (alterando sistemas de control, supervisión, facturación, etc.), entre otros.

Uno de los dispositivos eléctricos industriales más afectados por estas perturbaciones es el motor de inducción trifásico (Mdi), el cual hace parte integral de los accionamientos más utilizados actualmente en la industria mundial.

La mitigación de los efectos de las perturbaciones de la calidad de energía eléctrica en el Mdi, mejora la eficiencia y la calidad de onda de los sistemas eléctricos. Estas mejoras reducen costos de producción en las empresas y protegen las fuentes de energía natural no renovables, disminuyendo la cantidad de energía utilizada.

La metodología seguida por muchos investigadores para estudiar la mitigación de las perturbaciones electromagnéticas en el Mdi, se inicia con la elección de un correcto modelado tanto de la máquina como de las perturbaciones que lo afectan. Posteriormente se realizan simulaciones, una vez se ha validado que el modelo esté correctamente ajustado, para determinar cuáles son los efectos de las perturbaciones sobre las variables más relevantes en el Mdi, como son: corriente, tensión (llamada también voltaje, indistintamente), par y velocidad. Un análisis exhaustivo, seguido de la validación de los resultados, permite llegar a conclusiones que aportan datos tanto para la continuación de éstos estudios, como para el diseño de dispositivos y técnicas que mitiguen los efectos y conlleven a mejorar la calidad de energía eléctrica.

A continuación se realizará un resumen conceptual correspondiente al modelado del Mdi y a las perturbaciones estudiadas en este artículo, seguido de una revisión de los resultados obtenidos por algunos investigadores, incluyendo resultados de algunas investigaciones propias.

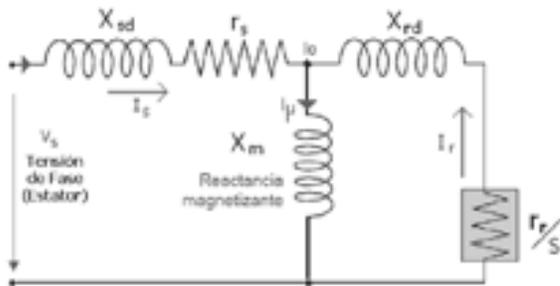
## **2. Modelado Matemático del Motor de Inducción (Mdi)**

Los Mdi son ampliamente estudiados y utilizados en la industria debido a sus características eléctricas de funcionamiento, gran potencia de arranque, facilidad de construcción y requerimientos de mantenimiento mínimo. Además de

proveer características constructivas muy atractivas para la industria, también son amigables con el medio ambiente, son totalmente eléctricos, no requieren aceites lubricantes y el rotor es totalmente aislado del estator, con lo cual, al no existir colector, no se requiere la sustitución periódica de los resortes y las escobillas de carbón.

Dos de los modelos del MdI más utilizados en las aplicaciones industriales y académicas son el modelo de jaula sencilla y el modelo de doble jaula.

**Fig. 1.** Circuito equivalente por fase del motor de inducción con rotor de jaula sencilla en régimen permanente.



En las Fig.1 se observa el circuito equivalente al modelo de Jaula sencilla, con 5 parámetros y sin pérdidas en el entrehierro, donde los subíndices s corresponden al modelo del lado del estator y los subíndices r corresponden a los subíndices del modelo del rotor. La reactancia magnetizante  $X_m$  corresponde al modelado del circuito magnético que atraviesa el entrehierro del motor. La Fig. 2 muestra el circuito equivalente del modelo del motor, cuando su rotor está conformado por dos jaulas de ardilla; para este caso, se tienen 7 parámetros y los subíndices 1 y 2 representan la jaula interior y exterior, respectivamente.

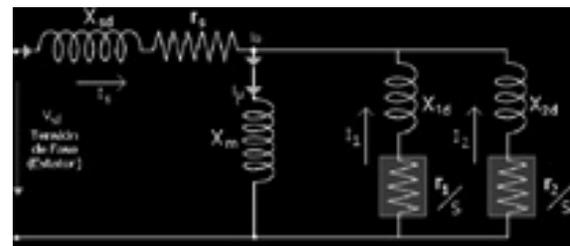
Ambos modelos desprecian las pérdidas mecánicas de la máquina (no hay elemento resistivo asociado). Además, se asumen algunas hipótesis para simplificar las ecuaciones de los modelos, éstas son: estator y rotor lisos (entrehierro constante), máquina con topología simétrica (bobinas del estator iguales entre sí y bobinas del rotor iguales entre sí), comportamiento magnético del entrehierro lineal (no se consideran los efectos de saturación e histéresis), permeabilidad

magnética del entrehierro elevada (reluctancia magnética despreciable frente a la del entrehierro), cantidad de fases y de pares de polos del rotor siempre coincide con las del estator (simplifica los modelos), distribución sinusoidal del campo magnético en el entrehierro (las fuerzas magneto-motrices debidas a los bobinados del estator siguen una distribución sinusoidal espacial a lo largo del entrehierro, despreciándose las armónicas espaciales).

El valor de los parámetros de cada modelo no es fácil de obtener. Algunas técnicas calculan parámetros que solo aplican para determinados puntos de funcionamiento [1], sin embargo, el estudio detallado del comportamiento de MdI requiere de una estimación de parámetros más exacta, que permita obtener un menor error en todo el espectro de funcionamiento del motor.

La mayoría de investigaciones parten de su propia técnica de estimación de parámetros con el fin de obtener parámetros confiables y que modelen adecuadamente el comportamiento del MdI en la zona de funcionamiento analizada.

**Fig. 2.** Circuito equivalente por fase del motor de inducción con rotor de doble jaula en régimen permanente.



Como ejemplo, en [2] los parámetros eléctricos desconocidos pueden estimarse conociendo sólo la tensión nominal del MdI, la corriente de par, la frecuencia y la velocidad para implementar un MdI en automóviles eléctricos, en [3] se presenta un métodos de estimación de parámetros multi-velocidad para el MdI, basado en la teoría de control de múltiples velocidades y filtro de Kalman extendido (EKF), para estimar el par de carga en el MdI. En [4] un observador adaptativo de alta ganancia es utilizado para compensar la incertidumbre del modelo y así estimar los parámetros, para controlar el MdI por una

estrategia de adaptación indirecta del sensor. En [5] se utiliza un modelo de triple jaula de un MdI para hallar los parámetros de un motor de barra profunda, mediante el uso de una técnica de ajuste de curva y análisis de elementos finitos. En [6, 7] se presentan procedimientos de auto-puesta para la estimación automática de parámetros de los MdI, consistentes en un enfoque paso a paso con diferentes señales de prueba para obtener los valores de los parámetros mientras se mantiene el motor en punto muerto. La implementación real permite mapear tanto convertidor como los parámetros, proporcionando datos precisos para la puesta a punto de los reguladores actuales para las unidades de medida sin sensor. En [8] se aplica la técnica de estimación a control de velocidad sin sensores, la estimación de parámetros propuesta se obtiene a partir de la velocidad angular de deslizamiento que se calcula a partir de las corrientes medidas y estimadas. En [9] El enfoque propuesto utiliza las relaciones analíticas para identificar los parámetros del modelo de tercer orden, basado en el modelo de espacio de estados no lineal, transformando el modelo no lineal en una ecuación de regresión lineal. Otros métodos que utilizan el EKF son [10, 11] requieren mediciones de los voltajes del estator, y corrientes y velocidad del rotor.

Aunque la bibliografía de investigaciones acerca de estimación de parámetros es extensa, cabe resaltar algunos de ellos por sus diversas metodologías y técnicas, en función a la aplicación requerida. Para la estimación de parámetros a partir de los datos proporcionados por el fabricante se pueden citar [12] Jaramillo et al., y [13-17], los cuales coinciden en que solo con estos datos no es suficiente para tener un comportamiento ajustado en todo el rango de funcionamiento.

Otros trabajos, como [18, 19], definen los “parámetros invariantes del sistema” como las relaciones entre los parámetros reales que producen la misma impedancia de entrada, para cualquier valor del deslizamiento y frecuencia de alimentación. Dichos parámetros pueden hallarse en función del modelo elegido, ya que son fijos, y aunque cambien los parámetros internos, esta relación se mantiene. En [19] además se muestra

que se pueden encontrar las relaciones entre los parámetros del modelo y la imposibilidad de estimarlos todos realizando solo medidas externas normales de tensión, corriente, velocidad y par o realizando medidas en régimen transitorio o calculando derivadas de orden superior, a menos que se tomen en cuenta hipótesis adicionales.

Por otro lado, para la estimación de los parámetros pueden utilizarse datos de entrada provenientes de medidas experimentales en el dominio del tiempo, como en [20, 21]. Para ello, se hace necesario realizar algoritmos que implementen Filtros de extendidos de Kalman o sistemas de modelos adaptativos de referencia para hallar los parámetros. Si las medidas se realizan en el dominio de la frecuencia [22, 23], los algoritmos necesitan métodos basados en ecuaciones de régimen permanente y ecuaciones dinámicas, como los ensayos de respuesta de frecuencia en reposo (Standstill). También se han desarrollado métodos que utilizan los algoritmos de Falals, mínimos cuadrados, iterativo de mínimos cuadrados, algoritmos genéticos adaptativos, aproximación multiescala, filtros extendidos de Kalman y Gauss-Newton. De cualquier forma, se ha demostrado que la convergencia del algoritmo diseñado depende directamente de tres factores, la aplicación particular, los datos de entrada y el modelo seleccionado.

Algunas investigaciones se enfocan en demostrar que es imposible determinar los parámetros de los modelos utilizando ecuaciones matemáticas sin realizar hipótesis adicionales [15, 18, 19, 24-26]. Otras estudian los mejores algoritmos para la estimación de parámetros [23, 27-31]. Algunos autores plantean la relación entre los parámetros y el número de medidas experimentales necesarias [19], o se basan en medidas tomadas por laboratorios especializados. Esto se debe a que no siempre se tienen los medios para realizar las mediciones necesarias, estos artículos coinciden en la necesidad de un gran número de medidas experimentales para obtener parámetros del modelo que representen el comportamiento del motor de manera satisfactoria. En [32] se propone un análisis con la variación del deslizamiento,  $s$ ; se calculan los valores de la resistencia de rotor,  $r_r$ , la del estator,  $r_s$ , las impedancias de rotor

$X_r$ , y estator,  $X_s$ , y la impedancia de entrehierro  $X_m$  a partir de las técnicas clásicas en estado estacionario. El algoritmo que utiliza es basado en la aplicación de la técnica de mínimos cuadrados a la diferencia entre los datos calculados, con algoritmos y ruido aleatorio y datos experimentales. Entre los aportes más significativos de este trabajo se tienen las diferencias entre los datos de las curvas del motor dadas por el fabricante y la medida experimental.

Algunas investigaciones discuten el uso de las técnicas modernas de identificación en la determinación de los valores de parámetros en estado estacionario, del circuito equivalente del motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla como modo deslizante [33, 34]. El procedimiento de la identificación se basa en las características de estado estable de corriente de fase y la potencia de entrada contra el deslizamiento.

Para la estimación de parámetros en régimen permanente, se encuentran investigaciones como [18, 19], donde se formulan relaciones que arrojan como conclusión la imposibilidad de estimar todos los parámetros realizando tan solo medidas externas. Este análisis lo hacen para la máquina de jaula sencilla y de doble jaula, ambas con y sin pérdidas en el hierro. Es interesante ver cómo se aplica a dos máquinas de diferente potencia teniendo en cuenta una serie de registros a diferentes velocidades de funcionamiento. También se analiza la confiabilidad numérica de los parámetros eléctricos de las máquinas de la inducción y se realizan formulaciones de la máquina de inducción de jaula sencilla y doble jaula, con y sin pérdidas en el hierro y se propone una solución formulando ecuaciones que utilizan mínimo número de parámetros, llamados parámetros identificables.

En [27], el modelo en espacio de estados de la máquina de inducción se descompone en dos sistemas casi desacoplados, utilizando una descomposición de escala “multi-tiempo” para obtener las admitancias reducidas operacionales con un consumo de mínima energía. En [29] se realizan medidas experimentales para aportar datos a la estimación de parámetros de los motores de inducción aplicando técnicas de mínimos

cuadrados, aprovechando la robustez de estas técnicas en ambientes ruidosos adicionando una nueva neurona, la TLS EXIN. Algo muy interesante en este estudio es la demostración del hecho de que los algoritmos ordinarios de redes neuronales no son fiables cuando el ambiente de implementación se caracteriza por ser muy ruidoso. También se estiman los parámetros de un motor de inducción por medio de un banco de pruebas. En el caso de que los datos sean demasiado ruidosos, se realiza un refinamiento de la TLS que considera explícitamente algunas relaciones entre el número de parámetros,  $k$ .

El diseño de algoritmos genético adaptativos o utilizando redes neuronales para un MdI se muestran en [28, 35], donde utilizan la probabilidad de cruce y la mutación de un algoritmo genético que cambia según la estadística de la aptitud de la población en cada generación y en [36] donde se presenta una nueva neurona lineal, el GeTLS EXIN para la estimación en línea de los parámetros eléctricos del MdI. Este tipo de manejo, implica un sofisticado equipo con alto nivel de procesamiento de datos. Cuando el número de parámetros aumenta, las variaciones en el algoritmo cambian radicalmente, sin asegurar que se pueda calcular la totalidad de los parámetros. En [15] se presenta un método numérico para la estimación de parámetros del modelo de doble jaula del motor de inducción partiendo de los datos del fabricante: energía mecánica de la carga completa, corriente eléctrica reactiva de carga completa, torque de corto circuito, torque y corriente de entrada. También se presenta un interesante análisis de sensibilidad del modelo respecto a los parámetros eléctricos, el cual muestra que la resistencia del estator es el parámetro menos significativo dentro de todos los parámetros. Las ecuaciones no lineales que se solucionan para la estimación de los parámetros se formulan como un problema de minimización con restricciones.

En [30] se presenta otro método para la estimación de parámetros en tiempo real, utilizando un filtro de Kalman extendido. El algoritmo se puede utilizar para adaptar los parámetros variantes con el tiempo y para las pérdidas de los flujos del rotor. Los modelos basados en dos ejes

son discutidos en [37], en un algoritmo genético cifrado que estima los parámetros del modelo. La exactitud y la validez del modelo y sus parámetros identificados se verifican con la ayuda de un motor de inducción de barra profunda de 5.5 kW, 380 V, 50 Hz. Este estudio muestra que los parámetros del motor de inducción de doble jaula no son fáciles de obtener y se propone una estimación de los parámetros de este modelo con ecuaciones que dependen de la energía mecánica y de la línea de voltaje. La corriente y par de arranque, el par máximo, el deslizamiento a plena carga y la eficiencia, son calculados con los parámetros estimados. En este trabajo se realiza también la prueba de respuesta al impulso, dentro del análisis en dos dimensiones con elementos finitos (FEA), aplicado al voltaje del estator. Puesto que dicha prueba es conveniente para modelar las perturbaciones sobre cierto punto la operación, un modelo de pequeña señal se deriva de la máquina de inducción de doble jaula. Además de los parámetros de pequeña señal, los parámetros de estado estacionario también se estiman usando el FEA. La prueba de la respuesta al impulso se basa en la hipótesis de un comportamiento lineal sobre un punto de la operación, lo que implica que los efectos de no linealidad son estudiados por otros métodos.

En [38] el autor de éste artículo, Jaramillo et al., diseña e implementa una técnica de estimación de los parámetros para los modelos de jaula sencilla y doble jaula, para el MdI. Esta técnica, denominada torque-speed tracking, inicia a partir de los datos del fabricante y resuelve los problemas causados por la falta de puntos de funcionamiento y por el método usado para minimizar el error en par. La técnica propuesta se valida tanto con los datos del catálogo de 64 máquinas de inducción, como con los datos experimentales de una máquina de inducción de 75 kW. Todos los errores de par obtenidos con la técnica propuesta fueron significativamente menores que aquellos obtenidos con las técnicas de referencia, para los modelos analizados. Esta técnica se puede implementar fácilmente en los algoritmos de estimación de parámetros que se basan únicamente en los datos del fabricante.

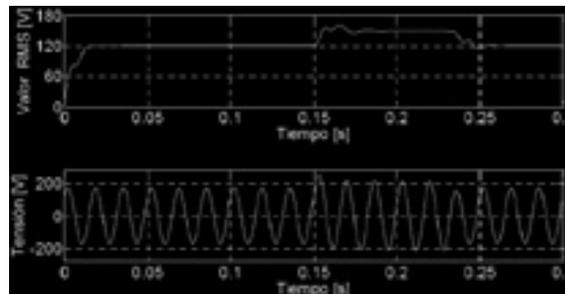
### 3. Perturbaciones electromagnéticas: huecos, Desequilibrios y Armónicos de Tensión

Las perturbaciones electromagnéticas se han clasificado en tres tipos, según la norma IEEE Estándar 1159 de 1995 [39]: variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente, perturbaciones de carácter transitorio y deformaciones de la forma de onda. Dentro de estos tipos, las perturbaciones han sido categorizadas en: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desbalances de tensión o corriente, distorsión en la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia.

#### A. Huecos de tensión

Los huecos de tensión son perturbaciones de corta duración, no repetitivas o transitorias, que se definen en las normas UNE-EN 50160 [40] y IEEE Std 1159-1995 [39], y se caracterizan por una tensión residual referida a la tensión inicial, denominada profundidad, y una duración temporal. La clasificación más utilizada de los huecos se obtuvo en [41]. Un hueco de tensión, por definición, es la disminución brusca del valor eficaz de la tensión de alimentación, a un valor entre un 90% y un 10% de la tensión nominal en las fases de la red eléctrica, seguida de una recuperación después de un corto periodo de tiempo, que puede estar entre 0.5 ciclos y 1 minuto (tiempo de duración), como se muestra en la Fig. 3. Las causas típicas de los Huecos de Tensión son los rayos, las maniobras en alta tensión, las variaciones bruscas de cargas (arranque de grandes motores) y los cortocircuitos.

Fig. 3. Hueco de Tensión. Fuente [39,42].

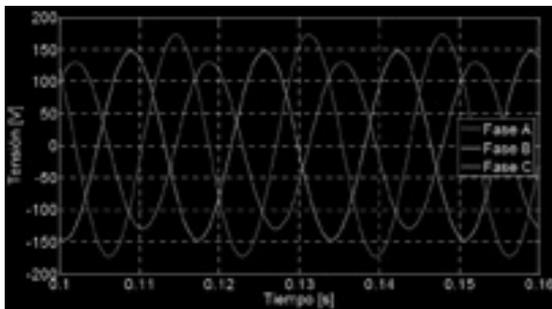


## B Sistemas de Tensiones desequilibrados

Los desequilibrios de tensión en los sistemas de energía son perturbaciones de carácter o estado estacionario, y deben ser manejados de manera sistemática con el fin de reducir al mínimo sus efectos negativos tanto en el equipo del cliente como para los servicios públicos de suministro.

Son causados por los desbalances de tensión, que en un sistema trifásico, se caracteriza porque los valores eficaces de las tensiones y/o corrientes de fase, o los ángulos entre fases consecutivas, no son iguales. Como ejemplo, se puede observar la Fig. 4. Se encuentran ligados a la aparición de componentes de secuencia negativa y/o homopolar en las tensiones y/o corrientes de red. El desbalance de tensión y corriente, a la frecuencia fundamental, es definido como la relación entre la componente de secuencia cero ó de secuencia negativa con respecto a la componente de secuencia positiva [42]. Esta perturbación suele ser causada por la conexión de cargas monofásicas en sistemas trifásicos, fallas de aislamiento en conductores no detectadas, desconexión de una fase en el banco de condensadores, transformadores conectados en delta abierto, entre otras.

Fig. 4. Desbalance de Tensión. Fuente [39, 42].



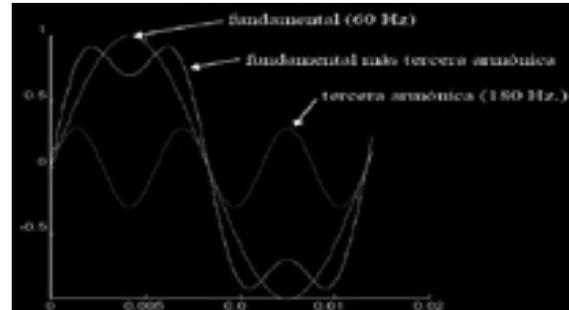
## C. Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de sistema. Estas perturbaciones periódicas generan una distorsión armónica en la forma de onda sinusoidal de tensión o corriente, como se puede apreciar en la Fig. 5. Cuando una señal está distorsionada por armónicos

puede descomponerse como la suma de varios armónicos los cuales pueden o no estar en fase con la componente fundamental. Por lo general, son causados por equipos no lineales operando en la red, hornos de arco eléctrico y fuentes conmutadas.

Fig. 5. Onda fundamental más tercera armónica.

Fuente [43].



## 4. Efecto de las perturbaciones sobre el Motor de Inducción

Las perturbaciones electromagnéticas en las redes de distribución afectan al motor de inducción (Mdl) en gran medida, ya que el Mdl hace parte integral de los accionamientos de potencia más utilizados actualmente en la industria mundial.

Los efectos que producen las perturbaciones sobre los Mdl son diversos y dependen de muchos factores, entre ellos, el tipo de motor, topología de la red, carga del motor, tipo y severidad de perturbación, entre otras.

En este capítulo se muestran algunos estudios de los efectos de tres perturbaciones electromagnéticas: huecos de tensión, sistema desequilibrado de tensiones y armónicos de tensión en la red de distribución, sobre el comportamiento del Mdl.

### A. Huecos de Tensión

Los efectos transitorios de los huecos de tensión sobre los motores de inducción trifásicos se reflejan principalmente en picos de intensidad, picos de par y pérdida de velocidad, como se demuestra en [44-48]. En el caso de huecos simétricos, éstos efectos dependen de la profun-

dad y duración del hueco, mientras que para los huecos asimétricos, dependen también del punto de onda inicial  $y_i$ , como se demuestra en [45]. En [45] se realiza dicho análisis utilizando el modelo de jaula sencilla (ampliamente utilizado para representar el comportamiento de máquinas de media y baja potencia [45, 49, 50]), sin embargo en muchas aplicaciones actuales se utiliza el modelo de doble jaula debido a su mejor ajuste de comportamiento en la zona de comportamiento inestable de la máquina [38, 51, 52]. Particularmente en [52] Jaramillo et al., estudian los efectos de los huecos de tensión sobre los MdI, realizando una comparación entre los resultados obtenidos con los modelos de jaula sencilla y doble jaula, obteniendo que el modelo de doble jaula permite obtener mejores resultados en los puntos de funcionamiento distantes al nominal.

En [53] se estudian los efectos de los huecos de tensión en los motores de inducción. Este estudio se enfoca a la contribución de la potencia reactiva debido al enlace de flujo atrapado del motor, y demuestra que previene el colapso rápido de la tensión, resultando un hueco de tensión en forma no rectangular. En [54] se presenta un método analítico para calcular el tiempo crítico de eliminación de los huecos de tensión en motores de inducción.

El efecto del punto de inicio de diferentes huecos de tensión simétricos (trifásico) sobre el comportamiento del motor de inducción, es estudiado en [55]. Aquí también se estudian los efectos de las caídas de tensión asimétricos de una sola fase y de dos fases. En [56] se presenta un estudio sobre los efectos de huecos de tensión en un MdI mediante simulación por computador con EMTP-ATP, y sus efectos sobre la tensión en bornes, corriente, par y velocidad del motor.

Un enfoque más orientado hacia la calidad de potencia en las redes de distribución se realizan en estudios como [57], donde se realiza la comparación de los efectos de huecos de tensión asimétricos en las unidades de MdI de velocidad ajustable; se analiza los efectos sobre el par y la desviación de la velocidad en variadores de velocidad. En [58] se implementa un modelo mate-

mático de STATCOM para validar su capacidad para la mitigación de la caída de voltaje debido al arranque directo del motor de inducción. Por otro lado, [59] muestra un modelo de simulación de restaurador dinámico de tensión (DVR), propuesto para mitigar un hueco de tensión causado por el arranque de un MdI. En [60] se proponen dos aplicaciones de compensadores de Huecos de tensión y UPS, 1) un compensador de huecos de 11-kW utilizando un generador de inducción auto-excitado y 2) una UPS compuesto por el sistema de volante y un generador de motor. En [61] se evalúan diferentes huecos de tensión en el rendimiento de los motores de inducción operando con FACTS, donde se evalúa el rendimiento del MdI bajo huecos de tensión simétricos y asimétricos.

## B. Sistemas de Tensiones desequilibrados

Los efectos de un sistema de tensiones desequilibrado, como alimentación para los MdI es un tema altamente estudiado en la actualidad, debido a que esta perturbación es una de las más comunes y permanentes en el decremento de la calidad de suministro eléctrico.

El rendimiento del MdI puede verse afectado significativamente en presencia de un sistema de alimentación de tensión desequilibrado. Por otro lado, los MdI pueden ayudar a reducir los niveles de desequilibrio de tensión de red pre-existent, de acuerdo con el informe técnico sobre la gestión de desequilibrio de tensión IEC/TR 61000-3-13:2008 (asignación y evaluación de las emisiones) [62]. En este trabajo, además se analiza la sensibilidad del nivel de carga del MdI en la contribución de la emisión de tensión desequilibrada en el punto de conexión, concluyendo que el aumento de niveles de carga en los MdI alteran el factor de desequilibrio de secuencia negativa de tensión (VUF) en el punto de conexión, en comparación con los motores de inducción de carga ligera. Otra conclusión importante es que las variaciones en el deslizamiento del motor tienen efecto sobre el voltaje o corriente de secuencia positiva en el punto de evaluación mientras que el valor de secuencia negativa permanece casi constante.

En [63] se estudian las características transitorias de un MdI en virtud de un hueco en un sistema de tensiones desequilibrado. En [64] se discute la necesidad de monitorear simultáneamente el desequilibrio de tensión y distorsiones armónicas en un MdI, además de los valores de tensión de raíz cuadrada media. Esto como una forma alternativa de obtener los parámetros de los modelos, relacionados con desequilibrio de tensión a la frecuencia fundamental, así como las distorsiones armónicas de tensión. El caso es estudiado con la representación de los valores instantáneos en los ejes d-q y en la norma euclidiana instantánea. Se propone entonces un nuevo índice de Calidad de Energía, para combinar los efectos de desequilibrio de tensión y distorsiones armónicas.

Otras investigaciones como [65-68], centran sus objetivos en el diagnóstico de fallas a causa de voltajes desequilibrados, como [69] donde se propone un método para discriminar los casos de falla en el devanado del estator, utilizando el Módulo de Vector de Park (PVM), identifica las condiciones de desequilibrio de tensión a través de la detección de señales de alta frecuencia presentes en los diferentes perfiles de PVM. Particularmente en [66] el método planteado se basa en el análisis de la relación de tercera armónica de la componente fundamental con la magnitud de la corriente y la tensión de alimentación para detectar diferentes porcentajes de fallo de aislamiento en diferentes condiciones de carga usando la red neuronal. Con este método se obtiene un alto grado de precisión en la detección y diagnóstico de fallos entre los efectos debidos a tensiones desequilibradas.

En trabajos como [63, 70-74] se analizan los efectos de desequilibrio de tensión en las variables a controlar. Particularmente en [74] se estudian los efectos sobre el par y la corriente de los MdI con el método de componentes simétricos, simulando 32 situaciones de desequilibrio estructuradas así: 8 tipos diferentes y 4 niveles para el factor de desequilibrio de tensión. Como conclusión se obtiene que el desequilibrio de tensión genera alto rizado en el par de torsión, y puede producir problemas o interrupciones no programadas en algunos procesos productivos.

En cuanto a la corriente, cada situación de desbalance de tensión genera también una corriente desbalanceada. En este trabajo se utiliza el modelo de jaula sencilla y se analiza con un tipo de carga. También otros autores se han enfocado específicamente en los efectos sobre el par mecánico del MdI, como [75, 76].

El rendimiento y la eficiencia también han sido investigados. En [77] se realizan pruebas experimentales para determinar si hay diferencias notables de rendimiento en motores de eficiencia Premium y Estándar, operando bajo condiciones de desequilibrio de tensión. El estudio concluye que en condiciones de funcionamiento de tensión desequilibrada la eficiencia de todos los motores disminuyó con el aumento de desequilibrio, aunque los niveles de desequilibrio de hasta 1,5% tienen un efecto despreciable, especialmente si el motor se hace funcionar a la tensión nominal. Para desequilibrios de hasta 5%, la eficiencia del motor disminuye en general en alrededor de 1% a 3%.

La pérdida de potencia en el MdI en función a las temperaturas excedidas, producto de los desequilibrios de tensión, también han sido de mucho interés en investigaciones como [78-80]. En [80] se presentan los resultados de un estudio experimental sobre reducción de potencia de un motor de inducción en diferentes condiciones de desequilibrio de tensión y su comparación con la tensión de reducción de potencia gráfica desequilibrio norma NEMA MG1. Los resultados obtenidos muestran que la tensión de secuencia positiva juega un papel importante en la reducción de potencia del motor de inducción bajo condiciones desequilibradas.

### *C. Armónicos*

Cuando un MdI es alimentado con un sistema de tensiones que contiene armónicos, su comportamiento se afecta directamente. Algunas de las variables afectadas en el MdI son: corriente, par, velocidad, factor de potencia, eficiencia y potencia, así como otros efectos: reducción en la vida útil, aumento de temperatura en funcionamiento, pérdidas adicionales, envejecimiento térmico, vibraciones y ruidos, torques pulsantes y pérdida de capacidad de potencia.

Para analizar las variables afectadas por una perturbación armónica en la red de distribución eléctrica existen muchas metodologías. En [81-87], el estudio se enfoca hacia las pérdidas de potencia y los efectos de los armónicos de tensión generados por los accionamientos compuestos por inversor de velocidad-MdI. En [82] se presenta un método novedoso para la estimación simultánea del campo magnético giratorio y los desplazamientos radiales del rotor en MdI sin cojinetes. Cuatro bobinados auxiliares de búsqueda están conectados a una fuente de tensión de alta frecuencia. Los voltajes de punto medio entre dos bobinas de búsqueda se procesan con circuitos analógicos sencillos para obtener desplazamientos radiales del rotor. Estos voltajes de punto medio se ven afectados por tensiones armónicas generadas por un inversor PWM de propósito general, conectado a los terminales del motor, además se proponen y ensayan dos métodos de eliminación de ruido. En [83] se presenta un estudio de la literatura correspondiente a mejorar el factor de potencia y la reducción de armónicos en MdI mediante técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM). En [84] se propone un algoritmo de modulación de ancho de pulso que utiliza voltajes de fase de referencia incluidos en la muestra instantáneas para calcular los tiempos de conmutación de los dispositivos reales. A medida que el tiempo de estado cero varía al azar de acuerdo con la secuencia de funcionamiento, se reducen armónicos dominantes y por lo tanto reduce el ruido acústico. Este algoritmo reduce la distorsión armónica comparado con el algoritmo estándar de modulación por ancho de pulso de espacio vectorial (SVPWM), que distribuye el tiempo de estado cero en partes iguales entre los dos vectores de tensión.

Otros estudios analizan pérdidas de potencia y torque debido a tensiones armónicas en MdI de alta velocidad [88] donde además se obtiene información útil para el diseño de motores de inducción de alta velocidad.

En [89] se estudia el efecto del ángulo de fase de los armónicos sobre el comportamiento del MdI. Dentro de las conclusiones más importantes se puede mencionar que en un sistema

de alimentación no sinusoidal no solo se deben tener en cuenta el orden del armónico y el factor de distorsión de voltaje, sino también el ángulo de fase del armónico. Un orden más bajo de los armónicos de secuencia positiva y negativa conllevan a una disminución en la eficiencia y un incremento en la temperatura de funcionamiento.

La investigación realizada en [90] hace un resumen de los efectos más relevantes, donde se menciona el incremento en las pérdidas en el motor y en la temperatura, pérdida en el tiempo de vida útil, incremento de ruido acústico y torques pulsantes. Además, se muestra que si la distorsión de tensión aumenta, el factor de potencia disminuye. También muestra que los armónicos de bajo orden tienen mayor efecto que los de mayor orden, para un valor determinado de distorsión armónica. También se concluye que los subarmónicos pueden tener un efecto considerable en los MdI, como por ejemplo un subarmónico de 6 Hz de secuencia positiva reduce la vida útil del motor en más de 60%.

Las estrategias de mitigación de armónicos son otra aplicación muy estudiada actualmente, como es el caso de [91], donde se estudian los aspectos de diseño y análisis para mitigar los armónicos de orden superior en los convertidores de potencia que alimentan los controladores vectoriales del MdI; o en [92], donde se propone una estrategia para el filtrado de corrientes de armónicos no deseados existentes en los bobinados del estator cuando un MdI se alimenta con un inversor de potencia sinusoidal (VSI). En realidad, el filtro es una inductancia especialmente diseñada conectada entre el motor multifase y el VSI. Los materiales de construcción del MdI también han sido estudiadas como alternativa a la mitigación de los efectos de los armónicos; en [93] se estudia la influencia del acero magnético de la carcasa del estator de MdI con rotor de Jaula de ardilla, sobre la eficiencia eléctrica y diagnóstico de fallos del rotor en el par electromagnético y en la fuerza desequilibrada de rotor. Se obtiene como resultado que la atenuación del campo electromagnético, cuando este campo pasa desde el interior a la superficie exterior del motor, depende de la frecuencia armónica, la longitud de onda de campo giratorio, la velocidad del rotor y de

las propiedades de los materiales de la carcasa. En [94] se presenta un algoritmo para eliminar armónicos selectivos para un convertidor de tensión utilizando una técnica de escalamiento multidimensional (técnica para el análisis exploratorio de datos multidimensionales).

En [95] se estudia la estimación de la perturbación: sub-armónicos sinusoidales en el dominio del tiempo, con aplicaciones en los diagnósticos del motor de inducción (por ejemplo, detección de barra partida del rotor). El método propuesto sería computacionalmente mucho más barato y podría ser fácilmente integrado en los dispositivos de gama baja.

## Conclusiones

El modelo de doble jaula muestra comportamientos diferentes y mejores, en determinadas zonas de funcionamiento del MdI, que el modelo de Jaula sencilla [38, 46].

Para realizar un estudio con mayor precisión, es necesario utilizar una técnica de estimación de parámetros de los modelos del MdI que permitan obtener una curva de funcionamiento par-velocidad ajustada a todos los puntos de funcionamiento del motor y no solo a los puntos dados por el fabricante [38].

Los efectos de los huecos de tensión simétricos dependen de la profundidad y duración del hueco, mientras que para los huecos asimétricos, dependen también del punto de onda inicial y [45].

Los huecos de tensión afectan considerablemente los picos de voltaje y corriente, y generan pérdida de velocidad en los MdI [52].

Las variaciones en el deslizamiento del motor tienen efecto sobre el voltaje o corriente de secuencia positiva en el punto de evaluación mientras que el valor de secuencia negativa permanece casi constante. Los estudios de sensibilidad demuestran que la atenuación del voltaje desbalanceado disminuye a medida que el nivel de carga del motor aumenta [62].

Los efectos del desequilibrio de tensión sobre el par y la corriente de los MdI se puede resumir en

alto rizado en el par de torsión y corriente desbalanceada en función al desequilibrio de tensión que lo afecta [74].

En condiciones de funcionamiento de tensión desequilibrada la eficiencia de los MdI disminuye con el aumento de desequilibrio. Sin embargo, para niveles de desequilibrio menores al 1,5% el efecto es despreciable, particularmente si el motor se hace funcionar a tensión nominal. Para desequilibrios de hasta 5%, la eficiencia disminuye alrededor de 1% a 3% [77].

En un sistema de alimentación con armónicos se deben tener en cuenta el orden del armónico, el factor de distorsión de voltaje y el ángulo de fase del armónico [89].

Los efectos más relevantes de las tensiones armónicas sobre el MdI se pueden reflejar en las pérdidas del motor, temperatura, disminución en la vida útil, incremento de ruido acústico, torques pulsantes, factor de potencia [90].

## Agradecimientos

El autor agradece a la Decanatura, Doctorado en Ingeniería y al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, CIDC, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UD FJC) por el apoyo económico para el desarrollo y presentación de los resultados del proyecto con código 2-5-379-13, de la convocatoria # 8 del 2013, de la UD FJC.

## Referencias

- [1] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 4 ed. vol. 1, 2005.
- [2] J. M. Terras, A. Neves, D. M. Sousa, and A. Roque, "Estimation of the induction motor parameters of an electric vehicle," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, 2011, pp. 1-6.
- [3] S. Wang, V. Dinavahi, and J. Xiao, "Multi-rate real-time model-based parameter estimation and state identification for induction motors," *Electric Power Applications, IET*, vol. 7, pp. 77-86, 2013.

- [4] A. Dib, "Sensorless indirect adaptive control with parameters and load-torque estimation of induction motor," in *Communications, Computing and Control Applications (CCCA), 2012 2nd International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [5] H. V. Khang and A. Arkkio, "Parameter estimation for a deep-bar induction motor," *Electric Power Applications, IET*, vol. 6, pp. 133-142, 2012.
- [6] L. Peretti and M. Zigliotto, "Automatic procedure for induction motor parameter estimation at standstill," *Electric Power Applications, IET*, vol. 6, pp. 214-224, 2011.
- [7] C. Wei, X. Dianguo, W. Gaolin, Y. Yong, and C. C. Chan, "Parameters estimation of induction motor at standstill concerning the nonlinearity of the system," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, 2009, pp. 1407-1411.
- [8] P. Kang Hyo, M. Cheol, N. Kee Hyun, J. Mun Kyu, and K. Young Ahn, "State observer with parameter estimation for sensorless induction motor," in *SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of*, 2011, pp. 2967-2970.
- [9] A. Dehghani-Pilehvarani and M. Dehghani, "Induction motor parameter estimation based on the nonlinear state space model," in *Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on*, 2011, pp. 1-1.
- [10] K. Yazid, K. Bouhoune, M. Mena, and A. Larabi, "Application of EKF to parameters estimation for speed sensorless vector control of two-phase induction motor," in *Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on*, 2011, pp. 357-361.
- [11] S. Aksoy, A. Muhurcu, and H. Kizmaz, "State and parameter estimation in induction motor using the Extended Kalman Filtering algorithm," in *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, 2010, pp. 1-5.
- [12] A. A. Jaramillo Matta, L. Guasch Pesquer, and E. Franco Mejía, "Estimación de Parámetros Invariantes Para un Motor de Inducción," *Dyna* vol. 78 p. 7, 2011 2011.
- [13] R. E. Araujo, A. V. Leite, and D. S. Freitas, "Estimation of physical parameters of an induction motor using an indirect method," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. ISIE 2002.*, 2002, pp. 535-540 vol.2.
- [14] A. Costa, G. Ciumbulea, N. Galán, and X. M. L. Fernández., "Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo," *Energía y Computación*, 2004.
- [15] J. Pedra and F. Corcoles, "Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturer data," *IEEE transactions on Energy conversion*, vol. 19, pp. 310-317, 2004.
- [16] M. H. Haque, "Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters From Manufacturer Data," *IEEE transactions on Energy conversion*, vol. 23, pp. 997-1004, 2008.
- [17] L. Keun, S. Frank, P. K. Sen, L. G. Polese, M. Alahmad, and C. Waters, "Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data," in *North American Power Symposium (NAPS), 2012*, 2012, pp. 1-6.
- [18] F. Córcoles, L. Guasch, P. Santibañez, and J. Pedra, "Estimación de parámetros en máquinas de inducción utilizando medidas de régimen permanente," in *SAAEI 98 Pamplona*, 1998.
- [19] F. Corcoles, J. Pedra, M. Salichs, and L. Sainz, "Analysis of the induction machine parameter identification," *IEEE transactions on Energy conversion*, vol. 17, pp. 183-190, 2002.
- [20] J. Stephan, M. Bodson, and J. Chiasson, "Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 746-759, 1994.
- [21] D. J. Atkinson, P. P. Acarnley, and J. W. Finch, "Observers for induction motor state and parameter estimation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 27, pp. 1119-1127, 1991.
- [22] J. Willis, G. Brock, and J. Edmonds, "Derivation of induction motor models from standstill frequency response tests," *IEEE Trans. on EC*, vol. 4, pp. 608-615, Dic. 1989 1989.
- [23] P. Pillay and R. Nolan, "Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, pp. 1273-1282, 1997.
- [24] J. Pedra, L.Sainz, and F. Córcoles, "Study of aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors," *IEEE Trans. On Powre Systems*, vol. 20, 2005.

- [25] J. Pedra and L. Sainz, "Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements," *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol. 153, pp. 263-270, 2006.
- [26] J. Pedra, "Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, pp. 137-146, 2006.
- [27] A. Onea, V. Horga, C. Botan, and M. Albu, "Multitime Scale Approach to Induction Motor Parameter Estimation," *IEEE Trans. On energy Conversion*, 2003.
- [28] X. Zhou and H. Cheng, "The Induction Motor Parameter estimation through an adaptative genetic algorithm," in *39th International Universities Power Engineering Conference*. vol. 39, 2004.
- [29] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Cirrincione, and G. A. Capolino, "A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the induction motor parameters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 1247-1256, 2003.
- [30] R. Jaramillo, Á. R. V. Cárdenas, and C. Nuñez, "Identification Of Induction Motor Parameter Using An Extended Kalman Filter," in *1st International Conf. on Electrical and Electronics Engineering*, 2004.
- [31] K. Wang, J. Chiasson, M. Bodson, and L. M. Tolbert, "A Non-Linear Approach for Identification of the Induction Motor Parameters," *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 50, 2005.
- [32] A. M. N. Lima, J. B. Jacobina, and E. B. d. s. Filho, "Nonlinear Parameter Estimation of Steady-State Induction Machine Models," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 44, 1997.
- [33] P. Yong Hun, P. Kang Hyo, B. Seung Chul, and K. Young Ahn, "Sliding mode observer with parameter estimation for sensorless induction motor," in *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*, 2010, pp. 37-41.
- [34] S. Rao, M. Buss, and V. Utkin, "Simultaneous State and Parameter Estimation in Induction Motors Using First- and Second-Order Sliding Modes," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 3369-3376, 2009.
- [35] K. Sundareswaran, H. N. Shyam, S. Palani, and J. James, "Induction motor Parameter Estimation using Hybrid Genetic Algorithm," in *Industrial and Information Systems, 2008. ICIIS 2008. IEEE Region 10 and the Third international Conference on*, 2008, pp. 1-6.
- [36] M. Cirrincione, G. Cirrincione, M. Pucci, and A. Jaafari, "The estimation of the induction motor parameters by the GeTLS EXIN neuron," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1680-1685.
- [37] E. Rahimpour, V. Rashtchi, and M. Pesaran, "Parameter Identification of deep-bar induction motors using genetic algorithm," *Springer-Verlag*, 2006.
- [38] A. Jaramillo-Matta, L. Guasch-Pesquer, L. Martinez-Salamero, and J. A. Barrado-Rodrigo, "Operating points estimation of three-phase induction machines using a torque-speed tracking technique," *Electric Power Applications, IET*, vol. 5, pp. 307-316, 2010.
- [39] "IEEE Standard 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.," New York, 1995.
- [40] UNE, "UNE-EN 50160:Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución," Madrid, 2001.
- [41] M. H. J. Bollen, in *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*: IEEE Press, 2000.
- [42] R. C. J. Alides and G. G. M. Angel, "análisis, modelado y control de un compensador estático para sistemas de distribución," in *Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010, p. 162.
- [43] <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material.../384495>, "Armonicos en las redes electricas," Chile, 2011.
- [44] M. H. J. Bollen, M. Hilger, and C. Roxenius, "Effect of induction motors and other loads on voltage dips: theory and measurements," *IEEE*, 2003.
- [45] L. Guasch, F. Corcoles, and J. Pedra, "Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 774-782, 2004.
- [46] J. Pedra, F. Corcoles, and L. Sainz, "Effects of unsymmetrical voltage sags on squirrel-cage

- induction motors," *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 1, p. 769, 2007.
- [47] L. Guasch, F. Corcoles, and J. Pedra, "Effects of unsymmetrical voltage sag types E, F and G on induction motors," *IEEE*, 2000.
- [48] J. Pedra, L. Sainz, and F. Corcoles, "Effects of symmetrical voltage sags on squirrel-cage induction motors," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 1672-1680, 2007.
- [49] F. Corcoles and J. Pedra, "Algorithm for the study of voltage sags on induction machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, pp. 959-968, 1999.
- [50] J. C. Gomez, M. M. Morcos, C. A. Reineri, and G. N. Campetelli, "Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, pp. 434-440, 2002.
- [51] J. Pedra, I. Candela, and L. Sainz, "Modelling of squirrel-cage induction motors for electromagnetic transient programs," *IET Electric Power Applications*, vol. 3, pp. 111-122, 2009.
- [52] A. A. Jaramillo Matta and L. Guasch Pesquer, *Huecos de Tensión y sus Efectos en la Máquina de Inducción Trifásica* vol. 1. Great Britain: Editorial Académica Española, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.
- [53] P. Aree, "Effects of Large Induction Motors on Voltage Sag," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, 2012, pp. 1-4.
- [54] W. Zhijun, W. Xiaoyu, and C. Y. Chung, "An Analytical Method for Calculating Critical Voltage Sag Clearance Time of Induction Motors," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 2412-2414.
- [55] M. Ojaghi, J. Faiz, H. Shahrouzi, and S. Alimohammadi, "Induction motors performance study under various voltage sags using simulation," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1-6.
- [56] F. Waskito and C. Banmongkol, "Simulation of the voltage sag effects on an induction motor," in *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 731-734.
- [57] Petronijevic, x, M., Veselic, B., Mitrovic, N., Kostic, V., and Jeftenic, "Comparative study of unsymmetrical voltage sag effects on adjustable speed induction motor drives," *Electric Power Applications, IET*, vol. 5, pp. 432-442, 2011.
- [58] L. S. Patil and A. G. Thosar, "Application of D-STATCOM to mitigate voltage sag due to DOL starting of three phase induction motor," in *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [59] Z. Jing, Z. Hui, and Q. Zhiping, "The study on a dual-feed-forward control of DVR to mitigate the impact of voltage sags caused by induction motor starting," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 1497-1500.
- [60] S. Kato, C. Miao-miao, H. Sumitani, and R. Shimada, "Semiconductor Power Converterless Voltage Sag Compensator and UPS Using a Flywheel Induction Motor and an Engine Generator," in *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, 2007, pp. 1680-1685.
- [61] M. Hedayati and N. Mariun, "Assessment of different voltage sags on performance of induction motors operated with shunt FACTS," in *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), 2012 3rd*, pp. 483-489.
- [62] U. Jayatunga, S. Perera, and P. Ciufo, "Impact of mains connected three-phase induction motor loading levels on network voltage unbalance attenuation," in *Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [63] A. Khoobroo, M. Krishnamurthy, B. Fahimi, and L. Wei-jen, "Effects of system harmonics and unbalanced voltages on electromagnetic performance of induction motors," in *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, 2008, pp. 1173-1178.
- [64] S. X. Duarte and N. Kagan, "A Power-Quality Index to Assess the Impact of Voltage Harmonic Distortions and Unbalance to Three-Phase Induction Motors," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1846-1854.
- [65] S. H. Kishan and S. P. Gupta, "Effect of voltage unbalance and stator inter turn short circuit on the characteristics of an induction motor," in

- Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [66] S. S. Refaat, H. Abu-Rub, M. S. Saad, E. M. Aboul-Zahab, and A. Iqbal, "Detection, diagnoses and discrimination of stator turn to turn fault and unbalanced supply voltage fault for three phase induction motors," in *Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 910-915.
- [67] M. Bouzid and G. Champenois, "Accurate stator fault detection insensitive to the unbalanced voltage in induction motor," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012, pp. 1545-1551.
- [68] L. El Menzhi and A. Saad, "Induction motor fault diagnosis using voltage Park components of an auxiliary winding - voltage unbalance," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [69] S. Das, P. Purkait, and S. Chakravorti, "Separating induction Motor Current Signature for stator winding faults from that due to supply voltage unbalances," in *Power and Energy in NERIST (ICPEN), 2012 1st International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [70] S. B. Singh, A. K. Singh, and P. Thakur, "Assessment of induction motor performance under voltage unbalance condition," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*, pp. 256-261.
- [71] D. Mirabbasi, G. Seifossadat, and M. Heidari, "Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection," in *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on*, 2009, pp. I-189-I-192.
- [72] D. L. R. Hollanda, M. L. S. Almeida, J. M. Matos, and A. L. F. Filho, "Comparative evaluation between computational models for representing the three-phase induction motor subjected to voltage unbalance," in *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES*, 2012 pp. 1-7.
- [73] S. B. Singh, A. K. Singh, and P. Thakur, "Assessment of induction motor performance under voltage unbalance condition," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*, 2012, pp. 256-261.
- [74] L. Guasch-Pesquer, L. Youb, F. Gonzalez-Molina, and E. R. Zeppa-Durigutti, "Effects of voltage unbalance on torque and current of the induction motors," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, 2012, pp. 647-652.
- [75] Y.-J. Wang, M.-H. Lee, and S.-W. Sung, "Analytical modeling of pulsating torques of induction motors caused by supply voltage unbalance," in *Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), 2011 International Conference and*, pp. 1-6.
- [76] P. Hong-Geuk, A. G. Abo-Khalil, L. Dong-Choon, and S. Kwang-Myoung, "Torque Ripple Elimination for Doubly-Fed Induction Motors under Unbalanced Source Voltage," in *Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS '07. 7th International Conference on*, 2007, pp. 1301-1306.
- [77] E. B. Agamloh, S. Peele, and J. Grappe, "A comparative analysis of voltage magnitude deviation and unbalance on standard and premium efficient induction motors," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE*, 2012, pp. 1-8.
- [78] K. Kraikitrat and S. Ruangsinchaiwanich, "Thermal effect of unbalanced voltage conditions in induction motor by FEM," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1-4.
- [79] D. Springer, E. Stolz, and E. Wiedenbrug, "Experimental analysis of industry standards on derating of a three-phase induction motor due to thermal stress caused by voltage unbalance," in *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*, 2009, pp. 1304-1308.
- [80] E. C. Quispe, X. M. Lopez-Fernandez, A. M. S. Mendes, A. J. Marques Cardoso, and J. A. Palacios, "Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, 2011, pp. 908-912.

- [81] A. Ceban, V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, and P. Taras, "Finite element diagnosis of rotor faults in induction motors based on low frequency harmonics of the near-magnetic field," in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 192-198.
- [82] A. Chiba and J. A. Santisteban, "A PWM Harmonics Elimination Method in Simultaneous Estimation of Magnetic Field and Displacements in Bearingless Induction Motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 124-131, 2012.
- [83] M. Naim, B. Singh, S. P. Singh, and J. Singh, "Improvement of power factor and reduction of harmonics in three-phase induction motor by PWM techniques: A literature survey," in *Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), International Conference on*, 2011, pp. 529-538.
- [84] P. N. Reddy, J. Amarnath, and P. L. Reddy, "Hybrid random PWM algorithm for direct torque controlled induction motor drive for reduced harmonic distortion," in *India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE*, 2011, pp. 1-5.
- [85] W. Yongxing, W. Xuhui, G. Xinhua, Z. Feng, and C. Wei, "Vector control of induction motor based on selective harmonic elimination PWM in medium voltage high power propulsion system," in *Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 6351-6354.
- [86] K. Yamazaki and S. Kuramochi, "Additional harmonic losses of induction motors by PWM inverters: Comparison between result of finite element method and IEC/TS 60034," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, pp. 1552-1558.
- [87] O. Duque-Perez, D. Morinigo-Sotelo, and M. Perez-Alonso, "Diagnosis of induction motors fed by supplies with high harmonic content using motor current signature analysis," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1-6.
- [88] K. Yamazaki, A. Suzuki, M. Ohto, and T. Takakura, "Harmonic loss and torque analysis of high speed induction motors," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 146-153.
- [89] L. Ching-Yin, L. Yuan-Jui, and C. Chao-Rong, "The effect of harmonic phase angle on the operation performance of a three-phase induction motor," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 2499-2505 vol. 4.
- [90] J. Grajales, J. Ramírez, and D. Cadavid, "Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 31, pp. 116-123, 2004.
- [91] M. R. Subbamma, V. M. Sudhan, K. S. R. Anjaneyulu, and P. Sujatha, "Design aspects and analysis for higher order harmonic mitigation of power converter feeding a vector controlled Induction motor drives," in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 282-287.
- [92] W. Tiejun, F. Fang, W. Xusheng, and J. Xiaoyi, "Novel Filter for Stator Harmonic Currents Reduction in Six-Step Converter Fed Multiphase Induction Motor Drives," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 498-506, 2013.
- [93] V. Fireteanu and P. Taras, "Influence of the magnetic steel encasing of induction motors on the efficiency of the rotor faults diagnosis based on the harmonics of the coil sensors output voltage," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012, pp. 1745-1750.
- [94] M. Sreedhar, N. M. Upadhyay, and S. Mishra, "Optimized solutions for an optimization technique based on minority charge carrier inspired algorithm applied to selective harmonic elimination in induction motor drive," in *Recent Advances in Information Technology (RAIT), 2012 1st International Conference on*, 2012, pp. 788-793.
- [95] A. Ukil, "Time-domain estimation of sub-harmonic sinusoidal disturbance in sinusoidal signal with applications in induction motor diagnostics," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012, pp. 1899-1905.